مدلی برای تخمین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای بتن مسلح با میلگردهای وصله‌دار خورده شده با در نظر گرفتن c/d_b *

یاسر مودی[۱] محمدرضا سهرابی[۲] سید روح‌الله موسوی[۳]

چکیده خوردگی ناحیهٔ وصله موجب تغییر مقاومت پیوستگی می شود. نسبت مقاومت پیوستگی در حالت خورده شده به مقدار مقاومت پیوستگی متناظر آن در شرایط عدم وجود خوردگی، مقاومت پیوستگی نسبی نامیده می شود. نتایج مقاومت پیوستگی نسبی در آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی (Pullout)، میلگرد درگیر در بتن (Tension stiffening) و تیرها با میلگردهای وصله‌شده (Beams with lap spliced bars) متفاوت است. در مطالعات گذشته نشان داده شد نتایج آزمایش میلگرد درگیر در بتن به نتایج آزمایش تیرها با میلگردهای وصله‌شده شباهت بیشتری دارد. در این مطالعه با استفاده از آزمایش‌های میلگرد درگیر در بتن، مدلی برای تعیین مقاومت پیوستگی نسبی میلگردهای خورده شده در شاخهٔ نزولی ارائه شده است. در نهایت با بهینه کردن این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از این مدل برای تعیین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار با میلگردهای خورده شده استفاده می شود. مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد استفاده از مدل پیشنهادی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. به‌طوری‌که استفاده از این مدل برای تخمین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار باعث کاهش ۱۶ درصدی خطای کلی نسبت به مدل شیهاتا می‌شود.

واژه‌های کلیدی بتن مسلح، خوردگی، مقاومت پیوستگی، تیر وصله‌دار.

A Proposed Model for Estimating the Relative Bond Strength of RC Beam with Corroded Lap Spliced Steel Bars, considering c/d_b

Yaser Moodi Mohamad Reza Sohrabi Seyed roohallah Mousavi

Abstract *Corrosion of lap spliced region causes the bond strength to change. The ratio of the bond strength in the corrotion state to the value of its corresponding in the absence of corrosion is called the relative bond strength. The results of the relative bond strength are different in Pullout test, Tension stiffening test and Beams with lap spliced bars test. The results of theTension stiffening test in the literature is more similar to those of Beams with lap spliced bars. In this study, a model has been proposed using tension stiffening tests, for determining the relative bond strength of corroded steel bars in the descending branch. Finally, this model has been optimized using genetic algorithm for determining the relative bond strength of RC Beam with corroded lap spliced steel bars. The current study shows that using the proposed model will lead to the beter result. The use of proposed model for the estimating the relative bond strength of RC beam with corroded lap spliced steel bars, leads to about 16 percent reduction in total error compared with Shihata model.*

Key Words Reinforce concrete, Corrosion, Bond strength, Lap spliced.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۳/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۲/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۲) دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۳) نویسنده مسئول: دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

Email: s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

مقدمه

خوردگی مسلح‌کنندهٔ فولادی یکی از مسائل مهمی است که در عملکرد طولانی‌مدت سازه‌های بتن مسلح اثر می‌گذارد [1]. شکل‌گیری محصولات خوردگی شامل حجم قابل توجهی است؛ یعنی حجم محصولات خوردگی از میلگرد اصلی بیشتر است. این محصولات باعث ایجاد تنش‌های کششی در بتن اطراف میلگرد می‌شود. این تنش‌های کششی ممکن است باعث ترک خوردن یا پوسته‌پوسته شدن پوشش بتن و کاهش مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن شود [2-3]. مطالعات گذشته نشان داده است که خوردگی میلگرد اثر قابل توجهی بر روی مقاومت پیوستگی نهایی بین میلگرد و بتن دارد، به‌طوری‌که در خوردگی‌های کم ممکن است مقاومت‌های پیوستگی افزایش یابد، اما خوردگی‌های شدید میلگرد باعث کاهش قابل توجه مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن می‌شود [3-7].

در این مطالعه ابتدا به معرفی برخی از آزمایش‌های تعیین مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن پرداخته می‌شود. با مقایسه این آزمایش‌ها با یکدیگر نشان داده می‌شود که آزمایش‌های میلگرد درگیر در بتن با آزمایش‌های تیرهای وصله‌دار تطابق بیشتری دارند؛ بنابراین، با استفاده از آزمایش‌های میلگرد درگیر در بتن رابطه‌ای تجربی برای تعیین کاهش مقاومت پیوستگی ناشی از خوردگی ارائه می‌گردد. در این رابطه اثر پوشش بتن به قطر میلگرد (c/d_b) در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌های محدودی برای تعیین اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار ارائه شده است، رابطهٔ ارائه شده برای تعیین مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار تحت خوردگی کالیبره می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مدل ارائه شده برای تعیین مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار تحت خوردگی در همبستگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

آزمایش‌های تعیین مقاومت پیوستگی

آزمایش بیرون کشیدگی (Pullout)

این آزمایش قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش برای تعیین تنش پیوستگی بین بتن و آرماتور است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در این آزمایش آرماتور در یک نمونه بتنی به شکل استوانه یا مکعب قرار داده شده و سپس درحالی‌که بتن در جای خود ثابت است، آرماتور به بیرون کشیده می‌شود.

مطالعات زیادی در زمینهٔ اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور با استفاده از این آزمایش انجام شده است. از جمله مطالعاتی که با استفاده از این آزمایش اثر خوردگی را بر روی مقاومت پیوستگی بررسی کرده‌اند، می‌توان مطالعات السلیمانی و همکاران [3]، لاو و همکاران [5]، توندلو [6]، ژانگ و همکاران [7]، لی و همکاران [8]، یالسینر و همکاران [9] و ژانگ و همکاران [10] را نام برد.

با استفاده از این آزمایش می‌توان نمودار تنش پیوستگی–لغزش را برای میلگردها رسم نمود؛ اما باید دقت شود در این آزمایش بتن تحت فشار است و میلگرد کشیده می‌شود درصورتی‌که در سازه واقعی بتن و میلگرد با هم تحت کشش یا فشار می‌باشند؛ بنابراین، آزمایش بیرون کشیدگی نماینده رفتار پیوستگی بتن و فولاد در تیرها نیست. همچنین، این آزمایش تنش پیوستگی را بیشتر از تنش پیوستگی واقعی در یک تیر نشان می‌دهد. لذا استفاده از این آزمایش برای اهداف طراحی مناسب نیست [۱۱].



شکل ۱ آزمایش بیرون کشیدگی [9]

آزمایش میلگرد درگیر در بتن

در این آزمایش، یک میلگرد درگیر شده در یک استوانه بتنی از دو طرف تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد. با ازدیاد نیرو، ترک‌های کششی در بتن ایجاد می‌شود. با رسیدن ترک به سطح میلگرد، تنش پیوستگی در امتداد ترک صفر شده و بین دو ترک متوالی از میلگرد به بتن توسعه می‌یابد. شکل (۲) شماتیکی از آزمایش میلگرد درگیر در بتن را نشان می‌دهد.

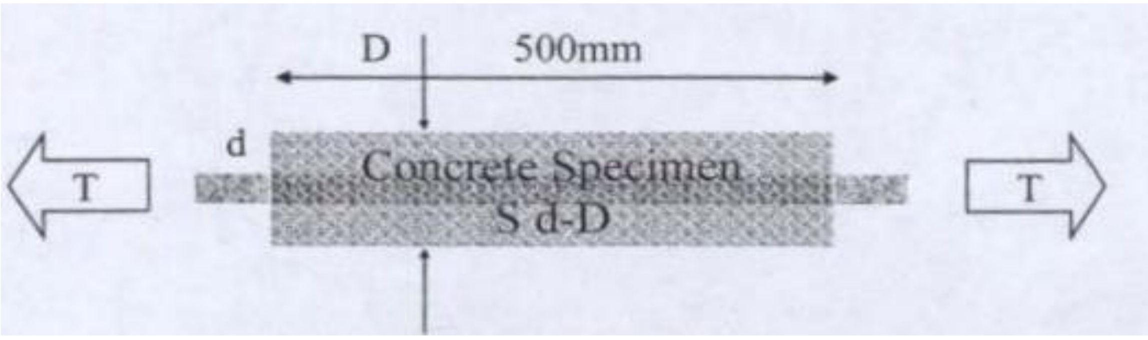
از جمله مطالعاتی که با استفاده از این آزمایش اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی را بررسی کرده‌اند، می‌توان به مطالعات شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، آمله و میرزا [12]، دای و همکاران [13]، آریانتو و شینوهرا [14] و کیم و همکاران [15] اشاره کرد.

با استفاده از این آزمایش نمودار تنش پیوستگی- لغزش رسم نمی‌شود؛ اما با توجه به اینکه در این آزمایش بتن تحت کشش است، این آزمایش شباهت بیشتری به رفتار میلگرد در یک تیر بتنی دارد [۱۱].

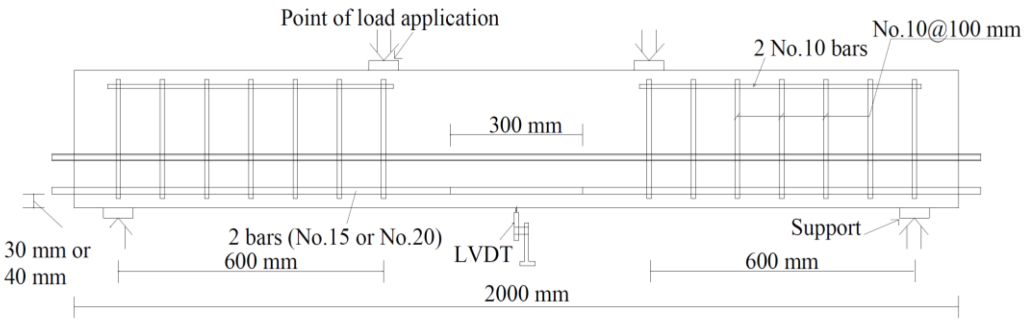
آزمایش تیر وصله‌دار

با استفاده از این آزمایش می‌توان به‌طور واقع‌بینانه برآورده نمود. همچنین به‌منظور تعیین مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد برای اهداف طراحی، می‌توان از این آزمایش استفاده کرد.

مطالعات کمی با استفاده از این آزمایش برای بررسی اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه شیهاتا [16] اشاره کرد.



شکل ۲ آزمایش میلگرد درگیر در بتن [4]



شکل ۳ آزمایش پیوستگی تیر واقعی با وصله [16]

اثر c/d_b بر روی مقاومت پیوستگی میلگردهای خورده شده با بتن

مطالعات کمی در مورد اثر نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد (c/d_b) بر روی مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد خورده شده انجام شده است. در میان مطالعات ذکر شده در بخش ۲، مطالعات شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، یالسینر و همکاران [9] و شیهاتا [16]، اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی نسبی (R_τ) بین میلگرد و بتن با c/d_b های مختلف تحت آزمایش‌های گوناگون را بررسی کرده‌اند. مقاومت پیوستگی نسبی (R_τ) به‌صورت نسبت مقاومت پیوستگی نمونه خورده شده (τ_{uc}) به مقاومت پیوستگی نمونه خورده نشده متناظر با آن (τ_{u0}) تعریف می‌شود:

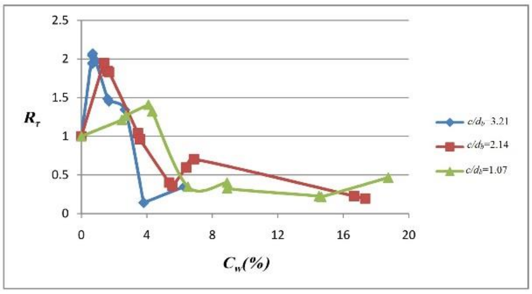
$$R_\tau = \frac{\tau_{uc}}{\tau_{u0}} \qquad (1)$$

در سال ۲۰۱۲، یالسینرو همکاران [9]، با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی را بررسی کردند. بررسی آنها شامل ۹۰ نمونه با c/d_b های ۱/۰۷، ۲/۱۴ و ۳/۲۱ تحت درصدهای خوردگی مختلف بود. مقاومت پیوستگی نسبی این نمونه‌ها برای بتن با مقاومت فشاری ۲۳ و ۵۱ مگاپاسگال با c/d_b های مختلف در مقابل درصد خوردگی میلگرد ($C_w(\%)$) به ترتیب در شکل‌های (٤-الف و ب) نشان داده شده است. $C_w(\%)$ مقدار خوردگی میلگرد است که به‌صورت ذیل محاسبه می‌شود:

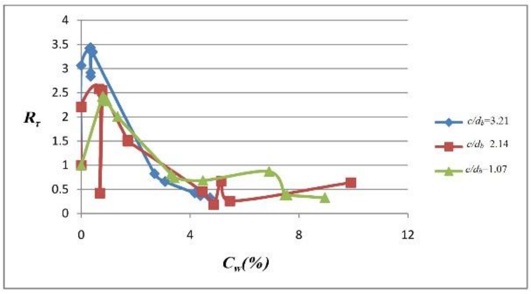
$$C_w = \frac{\bar{m}_0 l - m_c}{\bar{m}_0 l} \qquad (2)$$

که در آن $\bar{m}_0$ وزن واحد طول میلگرد خورده نشده، l طول میلگرد خورده شـــده و m_c وزن میلگرد بعد از خورده شدن است.

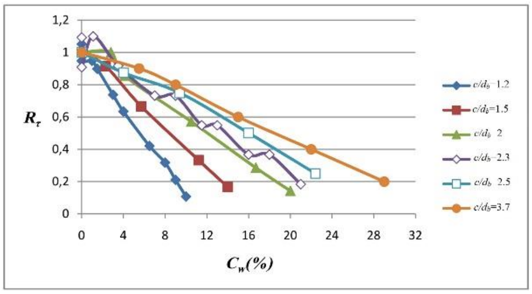
در سال ۲۰۰۷، شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، اثر c/d_b را بر روی مقاومت پیوستگی با استفاده از نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن تحت خوردگی بررسی کردند. این مطالعه شامل ۵۸ نمونه است که ١٤ نمونهٔ آنها به‌عنوان نمونهٔ کنترل و ٤٤ نمونهٔ دیگر تحت مراحل مختلف خوردگی با c/d_b های ۱/۲، ۱/۵، ۲، ۲/۳، ۲/۵ و ۳/۷ است. مقاومت نسبی این نمونه‌ها در مقابل درصد خوردگی برای c/d_b های مختلف در شکل (٤-ج) نشان داده شده است.



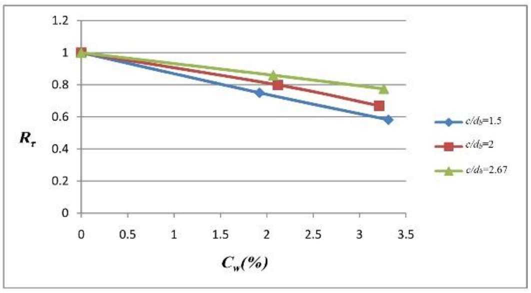
الف) آزمایش بیرون کشیدگی w/c=0.75 [9]



ب) آزمایش بیرون کشیدگی w/c=0.4 [9]



ج) آزمایش میلگرد درگیر در بتن [4]



د) آزمایش تیرهای وصله‌دار [16]

شکل ٤ اثر c/d_b بر روی مقاومت پیوستگی میلگردهای خورده‌شده

در سال ۲۰۱۱، شیهاتا [16] اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی ۹ تیر بتن مسلح وصله‌دار را بررسی کرد. در این مطالعه، تیرها دارای مقطع ۳۰۰×۲۰۰ میلی‌متر با c/d_b های ۱/۵، ۲ و ۲/٦۷ بودند و تحت خوردگی‌های ۰، ۲/۵، ۵ درصد قرار گرفتند. مقاومت پیوستگی نسبی این نمونه‌ها در مقابل درصد خوردگی برای c/d_b های مختلف در شکل (٤-د) نشان داده شده است.

با مشاهده شکل (٤) همان‌طور که قبلاً ذکر شد در خوردگی‌های کم مقاومت پیوستگی افزایش می‌یابد و در درصدهای خوردگی بالا مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. همچنین، شکل‌های (٤-ج و د) نشان می‌دهند با افزایش c/d_b، شیب منحنی در قسمت نزولی کاهش می‌یابد؛ اما از شکل‌های (٤-الف و ب) که با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی به‌دست‌آمده است، نمی‌توان به چنین نتیجه‌ای دست پیدا کرد؛ بنابراین همان‌طوری که در بخش قبل ذکر شد نتایج مقاومت پیوستگی آزمایش میلگرد درگیر در بتن به نتایج تیرهای وصله‌دار شباهت بیشتری دارد.

بنابراین در این مطالعه از نتایج آزمایش میلگرد درگیر در بتن برای مدل‌سازی اثر c/d_b بر روی مقاومت پیوستگی نسبی میلگردهای خورده شده استفاده شده است.

مدل‌های ارائه شده برای تخمین مقاومت پیوستگی نسبی

همان‌طور که در بخش ۱ ذکر شد، مقاومت پیو ستگی با افزایش خوردگی ابتدا افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به خوردگی بحرانی (C_{cr}) کاهش می یا بد. سطح خوردگی بحرانی که بعد از آن مقاومت پیوستگی شروع به کاهش می‌کند، به مقدار خوردگی لازم برای ترک خوردن پوشش بتن مربوط می‌شود. این سطح خوردگی بحرانی در تحقیقات گذشته در محدودهٔ ۰/۸٤ تا ۲ درصد ذکر شده است که در جدول (۱) آورده شده است.

مدل‌های کاهش مقاومت پیوستگی ارائه شده توسط محقّقان قبلی در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در بیشتر مدل‌های ارائه شده اثر c/d_b در نظر گرفته نشده است.

در مدل شایان‌فر و قلعه‌نوی [4] اثر c/d_b در نظر گرفته شده است. در آزمایش میلگرد درگیر در بتن بعد از بارگذاری ترک‌های عرضی بر روی نمونه ایجاد می‌شود. بر اساس فاصلهٔ ترک‌های عرضی مقاومت پیوستگی محاسبه می‌شود. در این مدل C_u مقدار خوردگی است که بعد از بارگذاری هیچ ترک عرضی در نمونه ایجاد نشود. به‌عبارت‌دیگر، فراتر از این خوردگی مقاومت پیوستگی به حداقل مقدار خود و نزدیک صفر رسیده است.

جدول ۱ مدل‌های مقاومت پیوستگی نسبی و خوردگی بحرانی

مرجع	رابطه	$C_{cr}(\%)$
بارگاوا و همکاران [17]	$R_\tau = e^{-0.117(C_w-1.5\%)}$	۱/۵
کابررا [18]	$R_\tau = 1 - 0.056C_w$	۰/۸٤
لی و همکاران [8]	$R_\tau = e^{-0.0561C_w}$	-
چانگ و همکاران [19]	$R_\tau = 0.116(\frac{C_w}{100})^{-0.55}$	۲
شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]	$R_\tau = 0.932 + 0.044\frac{c}{d_b} - 0.823\frac{C_w}{C_u}$	–

مدل پیشنهادی

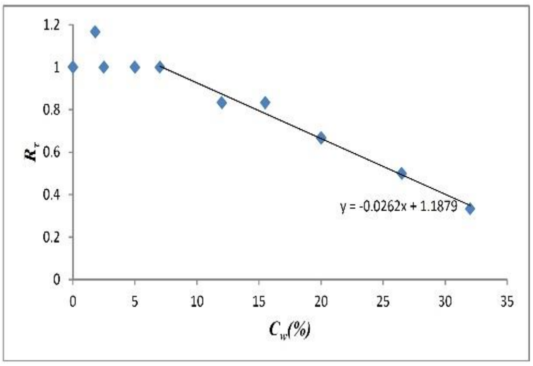
در این بخش با استفاده از نتایج نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن ارائه شده توسط شایان‌فر و قلعه‌نوی [4] که در جدول (۲) آورده شده، به ارائه مدلی برای تخمین کاهش مقاومت پیوستگی ناشی از خوردگی پرداخته شده است.

جدول ۲ اطلاعات نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن [4]

شماره نمونه	c/d_b	$C_w(\%)$	τ_{uc}	R_τ
۱	۲	۰/۰	۳/۲۹	۱/۰۰
۲	۲	۰/۰	۳/۲۹	۱/۰۰
۳	۲	۲/۸	۳/۲۹	۱/۰۰
۴	۲	۴/۱	۲/۸۲	۰/۸۶
۵	۲	۱۰/۵	۱/۸۸	۰/۵۷
۶	۲	۱۶/۷	۰/۹۴	۰/۲۹
۷	۲	۲۰/۰	۰/۴۷	۰/۱۴
۸	۳/۷	۰/۰	۶/۶۵	۱/۰۰
۹	۳/۷	۰/۰	۶/۶۵	۱/۰۰
۱۰	۳/۷	۵/۵	۵/۹۹	۰/۹
۱۱	۳/۷	۹/۰	۵/۳۲	۰/۸۰
۱۲	۳/۷	۱۵/۰	۳/۹۹	۰/۶۰
۱۳	۳/۷	۲۲/۰	۲/۶۶	۰/۴۰
۱۴	۳/۷	۲۹/۰	۱/۳۳	۰/۲۰
۱۵	۱/۲	۰/۰	۲/۹۵	۱/۰۵
۱۶	۱/۲	۰/۰	۲/۶۶	۰/۹۵
۱۷	۱/۲	۱/۰	۲/۶۶	۰/۹۵
۱۸	۱/۲	۱/۵	۲/۵۲	۰/۹۰
۱۹	۱/۲	۳/۰	۲/۰۷	۰/۷۴
۲۰	۱/۲	۴/۰	۱/۷۸	۰/۶۳
۲۱	۱/۲	۶/۵	۱/۱۸	۰/۴۲
۲۲	۱/۲	۸/۰	۰/۸۹	۰/۳۱
۲۳	۱/۲	۹/۰	۰/۵۹	۰/۲۱
۲۴	۱/۲	۱۰/۰	۰/۳۰	۰/۱۱
۲۵	۲/۳	۰/۰	۵/۲۳	۱/۰۹
۲۶	۲/۳	۰/۰	۴/۳۵	۰/۹۱
۲۷	۲/۳	۱/۱	۵/۲۷	۱/۱۰
۲۸	۲/۳	۳/۵	۴/۳۹	۰/۹۲
۲۹	۲/۳	۷/۰	۳/۵۱	۰/۷۳
۳۰	۲/۳	۹/۰	۳/۵۱	۰/۷۳
۳۱	۲/۳	۱۱/۵	۲/۶۳	۰/۵۵
۳۲	۲/۳	۱۳/۰	۲/۶۳	۰/۵۵
۳۳	۲/۳	۱۶/۰	۱/۷۶	۰/۳۷
۳۴	۲/۳	۱۸/۰	۱/۷۶	۰/۳۷
۳۵	۲/۳	۲۱/۰	۰/۸۸	۰/۱۸
۳۶	۳/۷	۰/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۳۷	۳/۷	۰/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۳۸	۳/۷	۱/۸	۶/۹۸	۱/۱۷
۳۹	۳/۷	۲/۵	۵/۹۸	۱/۰۰
۴۰	۳/۷	۵/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۴۱	۳/۷	۷/۰	۵/۹۸	۱/۰۰
۴۲	۳/۷	۱۲/۰	۴/۹۸	۰/۸۳
۴۳	۳/۷	۱۵/۵	۴/۹۸	۰/۸۳
۴۴	۳/۷	۲۰/۰	۳/۹۹	۰/۶۷
۴۵	۳/۷	۲۶/۵	۲/۹۹	۰/۵۰
۴۶	۳/۷	۳۲/۰	۱/۹۹	۰/۳۳
۴۷	۱/۵	۰/۰	۳/۶۶	۱/۰۰
۴۸	۱/۵	۰/۰	۳/۶۶	۱/۰۰
۴۹	۱/۵	۲/۳	۳/۳۵	۰/۹۲
۵۰	۱/۵	۵/۷	۲/۴۴	۰/۶۷
۵۱	۱/۵	۱۱/۲	۱/۲۲	۰/۳۳
۵۲	۱/۵	۱۴/۰	۰/۶۱	۰/۱۷
۵۳	۲/۵	۰/۰	۵/۶۷	۱/۰۰
۵۴	۲/۵	۰/۰	۵/۶۷	۱/۰۰
۵۵	۲/۵	۴/۰	۴/۹۶	۰/۸۷
۵۶	۲/۵	۹/۴	۴/۲۵	۰/۷۵
۵۷	۲/۵	۱۶/۰	۲/۸۴	۰/۵۰
۵۸	۲/۵	۲۲/۴	۱/۴۲	۰/۲۵

در این مدل اثر c/d_b در نظر گرفته شده است. برای این هدف، معادلهٔ بهترین منحنی برارزش شده (با نرم‌افزار اکسل) در شاخهٔ نزولی برای c/d_b های مختلف به دست آورده شده است. در همهٔ این منحنی‌ها بهترین منحنی برارزش شده به‌صورت خطی (درجه اول) است. a شیب این خط‌های برازش شده برای هر c/d_b است. شکل (۵)

نمونه‌ای از نحوهٔ محاسبهٔ a برای c/d_b=۳/۷ را نشان می- دهد. R^2 ضریب همبستگی معادلات خط با نتایج آزمایشگاهی است که در جدول (۳) برای هر دسته c/d_b آورده شده است. خوردگی بحرانی (C_{cr}) مقدار خوردگی است که در خوردگی‌های بزرگ‌تر از آن مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. برای به دست آوردن مقدار خوردگی بحرانی، در معادلهٔ خط به‌دست‌آمده برای هر c/d_b، مقدار مقاومت پیوستگی نسبی را برابر یک قرار داده و مقدار خوردگی متناظر با آن محاسبه می‌شود.



شکل ۵ خط برازش شده برای c/d_b=۳/۷

در جدول (۳) مقادیر a، C_{cr} و R^2 آورده شده است. جدول (۳) نشان می‌دهد با افزایش c/d_b شیب منحنی (a) کاهش می‌یابد. برای یافتن رابطهٔ بین آنها مقادیر c/d_b در مقابل a در شکل (٦) رسم شده است.

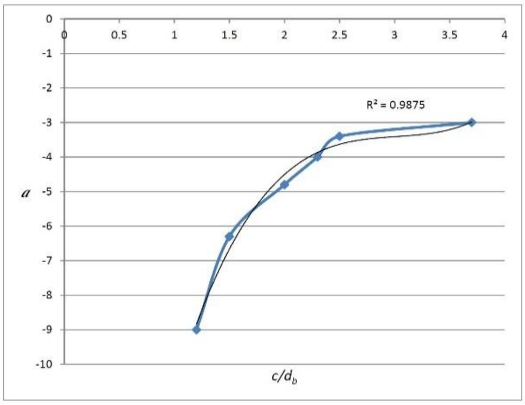
جدول ۳ پارامترهای معادلات خط برازش داده شده

c/d_b	a	C_{cr}(%)	R^2
۱/۲	-۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۹۹۷
۱/۵	-۰/۰٦۳	۰/۷٤	۰/۹۹۸
۲	-۰/۰٤۸	۱/۸۹	۰/۹۹۳
۲/۳	-۰/۰٤	۱/۲۷	۰/۹۷۷
۲/۵	-۰/۰۳٤	۱/۱۷	۰/۹۸۹
۳/۷	-۰/۰۳	۲/۰٦	۰/۹۹۹

شکل (٦) نشان می‌دهد رابطهٔ بین c/d_b و a به‌صورت منحنی درجه سه است. در شکل (٦) منحنی برازش شده رسم شده و مقدار R^2 آن آورده شده است. رابطهٔ بین c/d_b و a به‌صورت زیر است:

$$a = 0.845\left(\frac{c}{d_b}\right)^3 - 7.646\left(\frac{c}{d_b}\right)^2 + 23.25\left(\frac{c}{d_b}\right) - 27.2 \qquad (۳)$$

با مقایسه خوردگی بحرانی در c/d_b های مختلف مشاهده می‌شود، رابطهٔ خاصی بین خوردگی بحرانی و c/d_b وجود ندارد.



شکل ٦ اثر c/d_b بر روی شیب منحنی قسمت نزولی

بنابراین، مقدار خوردگی بحرانی با استفاده از میانگین‌گیری خوردگی بحرانی برای مقادیر مختلف c/d_b محاسبه می‌شود. این مقدار برابر ۱/۲ درصد است که در محدوده‌ای که محققان قبلی ذکر کرده‌اند و در جدول (۱) نشان داده شده، قرار گرفته است.

با جایگذاری معادلهٔ خط در شاخه نزولی منحنی مقاومت پیوستگی نسبی و در نظر نگرفتن افزایش مقاومت پیوستگی در خوردگی‌های کمتر از خوردگی‌های بحرانی، رابطهٔ مقاومت پیوستگی نسبی به‌صورت رابطهٔ (٤) خلاصه می‌شود:

$$R_{\tau}=\begin{cases}1 & C_w\leq 1.2\\ 1+[0.845(\frac{c}{d_b})^3-7.646(\frac{c}{d_b})^2 \\ +23.25(\frac{c}{d_b})-27.2](C_w-1.2) & C_w>1.2\end{cases}$$

(٤)

ارزیابی مدل پیشنهادی مقاومت پیوستگی نسبی

به‌منظور ارزیابی و مقایسه مدل پیشنهادی با دیگر مدل‌ها از شاخص‌های استفاده شد. این شاخص‌های آماری عبارت‌اند از: ۱- میانگین مربع، ۲- متوسط قدر مطلق خطا، ۳- انحراف معیار و ٤-خطای کلی که به ترتیب با روابط (٥) تا (۸) تعیین می‌شوند:

$$MSE=\frac{\sum_{1}^{N}\left(\frac{Theo_i-Expe_i}{Expe_i}\right)^2}{N} \quad (٥)$$

$$AAE=\frac{\sum_{1}^{N}\left|\frac{Theo_i-Expe_i}{Expe_i}\right|}{N} \quad (٦)$$

$$SD=\sqrt{\frac{\sum_{1}^{N}\left(\frac{Theo_i}{Expe_i}-\frac{Theo_{avg}}{Expe_{avg}}\right)^2}{N-1}} \quad (۷)$$

$$e_{tot}=100*\frac{\sum_{1}^{N}|Expe_i-Theo_i|}{\sum_{1}^{N}|Expe_i|} \quad (۸)$$

در رابطه‌های فوق، $Expe_i$ و $Theo_i$ به ترتیب نشان دهندهٔ مقاومت نسبی آزمایشگاهی و نتایج مقاومت نسبی مدل‌های تئوری است.

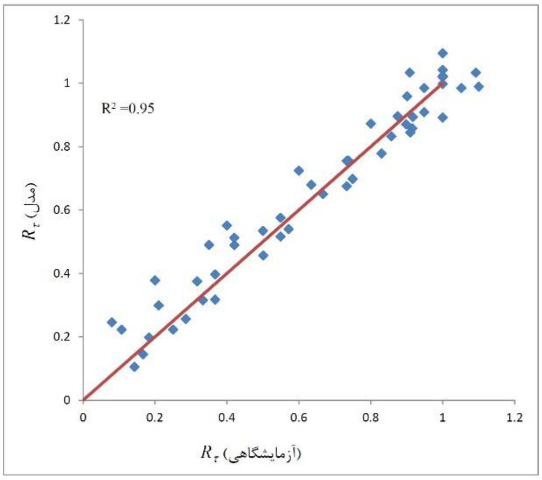
برای ارزیابی مدل علاوه بر نمونه‌های ارائه شده در مدل‌سازی نمونه‌های ارائه شده توسط آمله و میرزا [12] نیز استفاده شده است. آمله و میرزا [12] در سال ۱۹۹۹، مطالعه‌ای در مورد اثر خوردگی بر روی مقاومت پیوستگی با استفاده از آزمایش میلگرد درگیر در بتن انجام دادند. مطالعه آنها شامل ۸ نمونه به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر است.

شاخص‌های آماری برای نمونه‌های موجود در مدل‌سازی و نمونه‌های آمله و میرزا [12] محاسبه شد. این اطلاعات در جدول (٤) ارائه شده است.

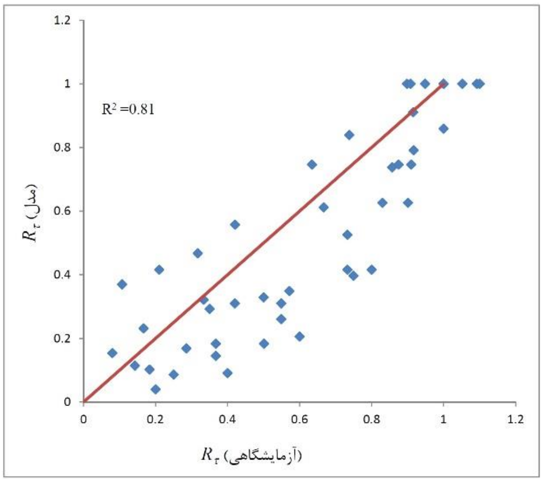
همان‌طور که در جدول (٤) مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های دیگر، با توجه به نتایج آماری دارای خطای کمتری است. به‌طوری‌که خطای کلی (e_{tot}) در مدل پیشنهادی نسبت به مدل شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]، بارگاوا و همکاران [17]، کابررا [18]، لی و همکاران [8] و چانگ و همکاران [19] به ترتیب ۱۸، ۷۰، ۷۷، ٥٥ و ٦٤ درصد مکاهش یافته است. شکل (۷) عملکرد مدل پیشنهادی و مدل‌های ارائه شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی مدل پیشنهادی نسبت به دیگر مدل‌ها بزرگ‌تر است. نتایج نشان می‌دهد مدل پیشنهادی دارای خطای کم‌تری است.

جدول ٤ شاخص‌های آماری در مدل‌های مختلف

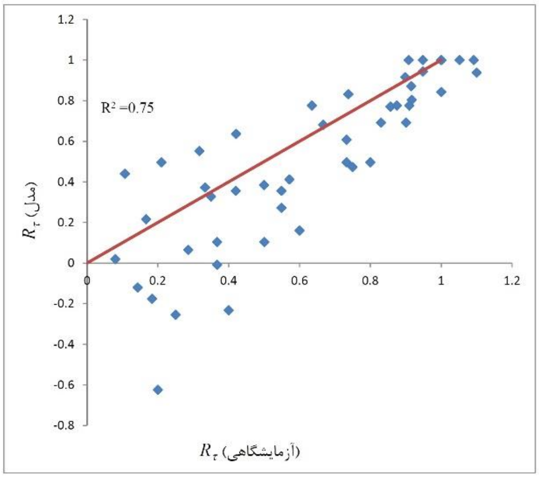
	MSE	AAE	SD	e_{tot}
شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]	۳/۰۱	۱۱/٤۱	۱۷/۱۲	۸/۱٤
بارگاوا و همکاران [17]	۸۹/۲٤	٥۲/٤۸	۹۰/۲٥	۲۲/۰۳
کابررا [18]	٤۱٤۱/۳٦	۱٤۸/۳٦	٦٥۱/۷۹	۲۸/۷۱
لی و همکاران [8]	۷/۷۱	۱۸/٥۸	۲۷/٤٤	۱٤/٦۷
چانگ و همکاران [19]	۱۳/۰۹	۲٦/۱۳	۳٥/٤۳	۱۸/۷۰
مدل پیشنهادی	۲/۷۱	۹/۷٤	۱٦/۰۹	٦/٦٥



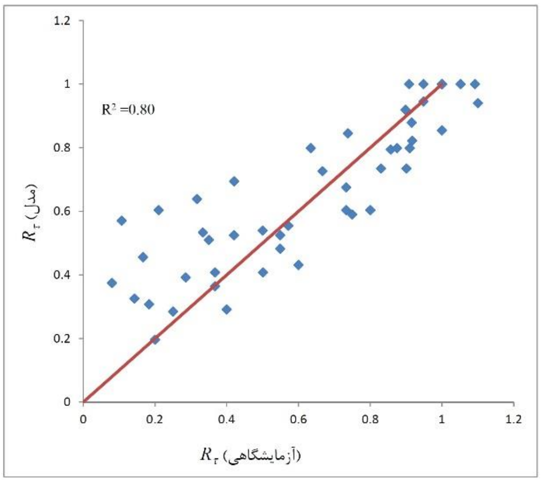
الف) مدل شایان‌فر و قلعه‌نوی [4]



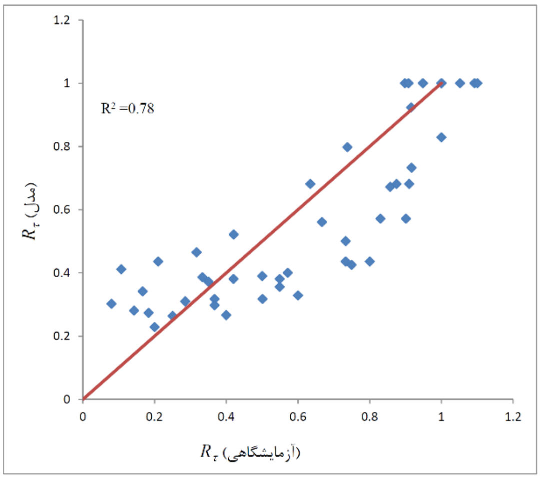
ب) بارگاوا و همکاران [17]



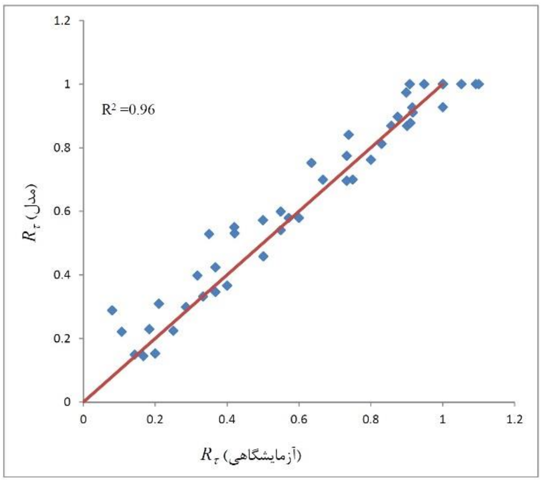
ج) کابررا [18]



د) لی و همکاران [8]



ه) چانگ و همکاران [19]



و) مدل پیشنهادی

شکل ۷ مقایسه‌ی بین نتایج آزمایشگاهی و مقاومت پیوستگی نسبی تخمین زده شده

مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار

در این بخش از مدل پیشنهادی ارائه شده در بخش قبل برای تخمین مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار استفاده می‌شود و نتایج مدل پیشنهادی با نتایج مدل شیهاتا [16] مقایسه می‌شود.

همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد مطالعهٔ کمی بر روی مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار انجام شده است. از جمله مطالعاتی که بر روی این نوع آزمایش انجام شده است مطالعه شیهاتا [16] است. اطلاعات مربوط به آزمایش‌های شیهاتا [16] در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵ اطلاعات نمونه‌های آزمایش‌های شیهاتا [16]

شماره نمونه	c/d_b	$C_w(\%)$	τ_{uc}	R_τ
۱	۱/۵	۰/۰۰	٤/۲۸	۱/۰۰
۲	۱/۵	۱/۹۲	۳/۲۱	۰/۷۵
۳	۱/۵	۳/۳۱	۲/٤۹	۰/۵۸
٤	۲/۰	۰/۰۰	٤/۰۲	۱/۰۰
۵	۲/۰	۲/۱۲	۳/۲۱	۰/۸۰
٦	۲/۰	۳/۲۱	۲/٦۹	۰/٦۷
۷	۲/۵	۰/۰۰	٤/۲٦	۱/۰۰
۸	۲/۵	۲/۰۷	۳/٦٦	۰/۸٦
۹	۲/۵	۳/۲٦	۳/۳۰	۰/۷۷

برای استفاده از مدل پیشنهادی برای مقاومت نسبی پیوستگی تیرهای وصله‌دار نیاز است مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش‌های شیهاتا [16] کالیبره شود؛ بنابراین باید شیب منحنی در شاخهٔ نزولی با استفاده از ضریب α کالیبره شود. ضریب α به‌صورت زیر در مدل در نظر گرفته می‌شود:

$$R_\tau = \begin{cases} 1 \quad C_w \le 1.2 \\ 1 + \alpha[0.845(\frac{c}{d_b})^3 - 7.646(\frac{c}{d_b})^2 \\ +23.25(\frac{c}{d}) - 27.2](C_w - 1.2) \quad C_w > 1.2 \end{cases} \tag{۹}$$

ضریب α را می‌توان با کمک بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه کرد، به‌طوری که مقدار خطای کلی (e_{tot}) که با استفاده از رابطهٔ (۸) محاسبه می‌شود، به حداقل مقدار خود برسد. با انجام بهینه‌سازی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی شیهاتا [16]، با جمعیت اولیه ۲۰۰، پس از ۲۰ تکرار و در نظر گرفتن محدودهٔ α بین صفر تا ده، مقدار α برابر ۳ حاصل شد. این نشان می‌دهد شیب شاخه نزولی منحنی مقاومت پیوستگی نسبی برای تیر با میلگردهای وصله‌دار خورده شده بیشتر از شیب منحنی نمونه‌های میلگرد درگیر در بتن است.

شیهاتا [16] رابطهٔ (۱۰) را برای مقاومت نسبی پیوستگی تیرهای وصله‌دار ارائه داد:

$$R_\tau = 1 - 0.1C_w \tag{۱۰}$$

برای مقایسه مدل پیشنهادی و مدل شیهاتا [16] شاخص‌های آماری برای هر دو مدل محاسبه شد و در جدول (٦) ارائه شد.

جدول ٦ شاخص‌های آماری در مدل‌های مختلف

	e_{tot}	MSE	AAE	SD
شیهاتا [16]	٤/٤۸	۰/۵۸	۵/۱٤	۸/۰٤
مدل پیشنهادی	۳/۷۷	۰/۳۵	۳/۸۹	٤/۹۵

همان‌طور که در جدول (٦) مشاهده می شود مدل پیشنهادی مقاومت پیوستگی نسبی تیرهای وصله‌دار را بهتر تخمین می‌زند. به‌طوری‌که استفاده از مدل پیشنهادی باعث کاهش ۱٦ درصدی خطای کلی نسبت به مدل شیهاتا [16] می شود. همچنین، ضریب همبستگی برای مدل شیهاتا [16] ۰/۸٦ و برای مدل پیشنهادی ۰/۹۲ است؛ که این ضریب هم نشان دهندهٔ عملکرد بهتر مدل پیشنهادی است.

نتایج

در این تحقیق مطالعه‌ای بر روی تحقیقات آزمایشگاهی گذشته در زمینهٔ مقاومت پیوستگی بین میلگردهای

خورده شــده و بتن انجام شــد. در ادامه مقایســه‌ای بین آزمایش های مختلف برای تعیین مقاومت پیوســتگی انجام گرفت و نهایتاً مدلی برای تعیین مقاومت پیوستگی تیرهای وصله‌دار ارائه شد. بر اساس این بررسی‌ها نتایج زیر به‌دست‌آمده است:

۱. نسبت پوشش بتن به قطر میلگرد اثر قابل توجهی بر روی مقاومت پیوســتگی میلگردهای خورده شــده در سطح‌های خوردگی یکسان دارد.

۲. با بررســی انجام گرفته بر روی نوع آزمایش ها، مشاهده می‌شود مقاومت پیوستگی نسبی آزمایش‌های میلگرد درگیر در بتن شباهت بیشتری با آزمایش‌های تیرهای وصله‌دار واقعی دارد.

۳. مدل پیشــنهادی در این مطالعه، مقاومت پیوســتگی نسبی تیرهای وصله‌دار را نسبت به مدل شیهاتا بهتر تخمین می‌زند. به‌طوری‌که استفاده از این مدل باعث کاهش ۱۶ درصدی خطای کلی نسبت به مدل شیهاتا [16] می‌شود.

مراجع

1. Duan, A., Dai, J.G. and Jin, W.L., "Probabilistic approach for durability design of concrete structures in marine environments", ASCE, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 1-8, (2014).
2. Cairns, J., Du, Y. and Law, D.W., "Structural performance of corrosion-damaged concrete beams", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 60, No. 5, pp. 359-370, (2008).
3. Al Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M., Basunbul, I.A. and Rasheeduzzafar, "Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members", *ACI*, *Structural Journal*, vol. 87, No. 2, pp. 220-231, (1990).
4. Shayanfar, M.A. and Ghalenovi, M., "Corrosion effects on tension stiffening behavior Reinforced Concrete", *Computers and Concrete*, vol. 4, No. 5, pp. 403-424, (2007).
5. Law, M.W., Tang, D., Molyneaux, T.K.C. and Gravina, R., "Impact of crack width on bond: confined and unconfined rebar", *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 7, pp. 1287-1296, (2011).
6. Tondolo, F., "Bond behaviour with reinforcement corrosion", *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 926–932, (2015).
7. Zhang, X., Liang, X., Wang, Z., Huang, H. and Zhou, H., "An Experimental Study on Effect of Steel Corrosion on the Bond–Slip Performance of Reinforced Concrete", *5th International Conference on Durability of Concrete Structures*, (2016).
8. Lee, H.S., Noguchi, T. and Tomosawa, F., "Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, No. 3, pp. 1313-1318, (2002).
9. Yalciner, H., Eren, O. and Sensoy, S., "An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level", *Cement and Concrete Research*, vol. 42, No. 5, pp. 643–655, (2012).

10. Zhang, W.P., Chen, H. and Gu, X.L., "Bond behaviour between corroded steel bars and concrete under different strain rates", *Magazine of Concrete Research*, vol. 68, No. 7, pp. 364-378, (2016).

۱۱. مستوفی‌نژاد، د.، *سازه‌های بتن آرمه (جلد دوم)*، اصفهان، انتشارات ارکان دانش، (۱۳۸۸).

12. Amleh, L. and Mirza, S., "Corrosion Influence on Bond between Steel and Concrete", ACI, *Structural Journal*, vol. 96, No. 3, pp. 415-423, (1999).

13. Dai, J., Kato, E., Iwanami, M. and Yokota, "Cracking and tension stiffening behavior of corroded RC members", *Report of the port and airport research institute*, vol. 46, No. 2, pp. 1-24, (2007).

14. Aryanto, A. and Shinohara, Y., "Bond Behavior between Steel and Concrete in Low Level Corrosion of Reinforcing Steel", 15 WCEE, (2012).

15. Kim, H.R., Choi, W.C., Yoon, S.C. and Noguchi, T., "Evaluation of Bond Properties of Reinforced Concrete with Corroded Reinforcement by Uniaxial Tension Testing", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, No. 3, pp. 43-52, (2016).

16. Shihata, A., "CFRP strengthening of RC beam with corroded lap spliced steel bars", Master of Applied Science Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Canada, (2011).

17. Bhargava, K., Ghosh, A.K., Mori, Y., Ramanujam, S., "Suggested Empirical Models for Corrosion-Induced Bond Degradation in Reinforced Concrete", *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, No. 2, 2008, pp. 221–230.

18. Cabrera, J.G., "Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion", *Cement and Concrete Composite*, vol. 18, No. 1, 1996, pp. 47–59.

19. Chung, L., Kim, J.J. and Yi, S., "Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars", *Cement and Concrete Composite*, vol. 30, No. 7, 2008, pp. 603–611.